

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160700

袁天佑, 冀建华, 王俊忠, 孙笑梅, 闫军营, 王志勇, 牛俊义. 腐植酸与氮肥配施对冬小麦氮素吸收利用及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 365–372

Yuan T Y, Ji J H, Wang J Z, Sun X M, Yan J Y, Wang Z Y, Niu J Y. Effect of combined application of humic acid and nitrogen fertilizer on nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 365–372

腐植酸与氮肥配施对冬小麦氮素吸收利用及产量的影响*

袁天佑^{1,2}, 冀建华², 王俊忠², 孙笑梅², 闫军营², 王志勇², 牛俊义^{1**}

(1. 甘肃农业大学农学院 兰州 730070; 2. 河南省土壤肥料站 郑州 450002)

摘要: 研究腐植酸与氮肥配施对冬小麦产量、氮素吸收及经济效益的影响, 可为提高氮肥的增产效益, 减少氮肥对生态环境的污染提供理论指导。在河南褐土区冬小麦-夏玉米轮作制度下, 于 2014 年开始在河南省南阳市卧龙区开展田间定位试验, 共设置单施磷钾肥、常规施肥、单施腐植酸、常规施肥+腐植酸、常规施肥减氮 15%+腐植酸、常规施肥减氮 30%+腐植酸 6 个处理, 分析不同氮肥与腐植酸配施下冬小麦产量和氮肥利用的特征。结果表明, 腐植酸与氮肥配施可以有效提高冬小麦的产量及其构成要素, 促进植株对氮素的累积, 提高氮肥利用率。其中, 常规施肥减氮 15%+腐植酸处理下冬小麦产量、籽粒氮含量、籽粒氮累积量、地上部总氮累积量、氮肥利用效率和纯收益均增加, 与常规施肥相比, 冬小麦产量增加 4.96%, 氮肥利用效率增加 23.42%, 纯收益增加 2.18%。常规施肥减氮 30%+腐植酸条件下冬小麦产值和收益降低。因此, 在施用腐植酸的基础上, 配施适量氮肥才能获得较高的产值和收益。常规施肥减氮 15%+腐植酸是本研究区域最佳的施肥模式, 对实现现代化农业生产的高产高效、资源节约和生态环境保护具有重要意义。

关键词: 腐植酸; 氮肥; 冬小麦; 产量; 氮素吸收; 氮肥效率

中图分类号: S143.1; S512.1+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)03-0365-08

Effect of combined application of humic acid and nitrogen fertilizer on nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat*

YUAN Tianyou^{1,2}, JI Jianhua², WANG Junzhong², SUN Xiaomei², YAN Junying²,
WANG Zhiyong², NIU Junyi^{1**}

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Henan Soil and Fertilizer Station, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Studies on the effects of combined humic acid and nitrogen fertilizer application on nitrogen (N) uptake, utilization and yield of winter wheat can provide theoretical basis for increasing the productivity of N fertilizers and reducing N fertilizer pollution in the winter wheat-summer maize rotation cropping system. A field experiment was conducted in 2014 at Wolong District in Nanyang City, Henan Province, an area with a predominant winter wheat and summer maize rotation cropping system and drab soils. The experiment was consisted of 6 treatments — no N fertilizer (only P and K fertilizers), conventional fertilization (P and K fertilization with N application rate of 180 kg·hm⁻²), single humic acid (3 000 kg·hm⁻²), conventional fertilization plus humic acid, conventional fertilization with 15% less N plus humic acid and conventional fertilization with

* 科技部粮食丰产科技工程项目(2013BAD07b07)和河南省政府与中国科学院科技服务网络计划(KFJ-SW-STS-142)项目资助

** 通讯作者: 牛俊义, 主要从事作物栽培与生理生态研究。E-mail: niujy@gsau.edu.cn

袁天佑, 主要从事土壤肥料与作物栽培方面的研究。E-mail: tianyouyuan_2010@163.com

收稿日期: 2016-08-10 接受日期: 2016-11-22

* Supported by the Food Science and Technology Project of Ministry of Science and Technology of China (2013BAD07b07) and the Science and Technology Service Network Initiative of Chinese Academy of Sciences (KFJ-SW-STS-142)

** Corresponding author, E-mail: niujy@gsau.edu.cn

Received Aug. 10, 2016; accepted Nov. 22, 2016

30% less N plus humic acid. The characteristics of yield and N fertilizer utilization of winter wheat under different fertilization modes were analyzed. The results showed that combined application of humic acid and N fertilizers increased winter wheat yield, and promoted N accumulation and utilization rate. Among treatments, the treatment of conventional fertilization with 15% less N plus humic acid treatment had the best effects. Winter wheat yield, grain N content, grain N accumulation, aboveground total N accumulation, N use efficiency and net income increased. Compared with conventional fertilization, yield increased by 4.96%, N use efficiency by 23.42% and net income by 2.18%. However, the 30% less N treatment reduced winter wheat productivity and revenue. Thus, on the basis of the application of humic acid, the appropriate dose of N fertilizer was recommended to ensure high productivity and income. The conventional fertilization with 15% less N plus humic acid was the best fertilization mode in the study area. The results are beneficial for improving productivity efficiency of agricultural, resources and environmental protection.

Keywords: Humic acid; N fertilizer; Winter wheat; Yield; Nitrogen uptake; Nitrogen fertilizer use efficiency

化肥是粮食的“粮食”，我国每年化肥施用量占世界生产化肥总量的 1/3^[1-2]。但是，目前我国农田氮肥的当季利用率仅为 30%~35%^[3-4]。化肥损失不仅对环境造成污染，还影响作物的品质。因此，减少化肥用量、提高氮肥利用效率和作物产量对实现农业的环境友好发展具有重要意义^[5-7]。腐植酸是近年来研究比较热门的新型肥料品种，具有良好的化学活性和生物活性^[8-10]。腐植酸含有多种活性基团，如羧基、羟基和甲氧基等，具有较强的离子交换能力和吸附能力^[11]。腐植酸与氮肥结合施用能促进作物生长及对氮的吸收，提高肥效^[12-13]。孙建好等^[14]相关研究表明：腐植酸与氮、磷配施提高冬小麦(*Triticum aestivum*)产量 305.60 kg·hm⁻²，腐植酸与磷肥配施能提高大豆(*Glycine max*)产量 261.90 kg·hm⁻²，另外，施用腐植酸对紫花苜蓿(*Medicago sativa*)产量和品质的提升具有促进作用；郝青等^[15]研究表明，腐植酸配施不仅促进作物生长发育、提升夏玉米(*Zea mays*)产量，还能培肥地力、提高土壤肥效。配施一定量的腐植酸不仅可以提高肥效达到活化、改良土壤的作用，还能刺激作物生长、提高作物产量和品质，在农田生态系统上应用潜力巨大^[16-18]。

南阳盆地褐土区是我国重要的粮食生产区，冬小麦又是最主要的种植作物。已有的腐植酸研究多集中于叙述性论述或者机理性研究，鲜有腐植酸直接配施无机肥对冬小麦生产影响的报道，尤其是在河南褐土区的研究鲜见报道。同时，我国人多地少的国情决定了我国的新型现代农业必须走集约化环境友好的发展道路，必须解决既能在培肥地力的基础上获得作物高产，又能减轻对生态环境压力的化肥使用技术即减氮增效技术。本文旨在通过施用腐植酸减少氮肥用量的氮肥运筹模式，探求在保证冬小麦稳产、增产及农民增收的前提下，提高氮肥利用率，降低生态环境污染的合理施氮措施，以期为实现农业生态系统高产、高效和促进农业环境友好

发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2014 年(田间定位试验第 3 年)在河南省南阳市卧龙区英庄镇前英庄村进行，供试土壤为黄褐土，前茬作物为玉米，玉米收获后秸秆全部还田，并在冬小麦播种前进行深耕深松，试验前 0~20 cm 土层土壤理化性状分别为：pH 6.57，碱解氮 69.97 mg·kg⁻¹，速效磷 23.57 mg·kg⁻¹，速效钾 84.25 mg·kg⁻¹，有机质 11.32 g·kg⁻¹。

试验田设在永久性耕地上，设 6 个处理，即：1)不施氮肥即单施磷钾肥(T1)；2)常规施肥，全生育期施纯氮 180 kg·hm⁻²(T2)；3)单施腐植酸 3 000 kg·hm⁻²(T3)；4)常规施肥+腐植酸，全生育期施纯氮 180 kg·hm⁻²，配施腐植酸 3 000 kg·hm⁻²(T4)；5)常规施肥减氮 15%+腐植酸，全生育期施纯氮 153 kg·hm⁻²，配施腐植酸 3 000 kg·hm⁻²(T5)；6)常规施肥减氮 30%+腐植酸，全生育期施纯氮 126 kg·hm⁻²，配施腐植酸 3 000 kg·hm⁻²(T6)。试验采取随机区组排列，3 次重复，小区面积 6 m×8 m=48 m²，同时设置保护行和观察道。供试小麦品种为‘周麦 16’。供试肥料品种氮肥为尿素(46%)，磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)，钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%)；腐植酸：pH 为 4.74，有机质为 809.2 g·kg⁻¹，全氮为 7.6 g·kg⁻¹，全磷为 3.8 g·kg⁻¹，全钾为 2.3 g·kg⁻¹，试验中所使用的腐植酸均由南阳市沃泰肥业有限公司提供。

除 T3 处理(单施腐植酸)外，其他所有处理(T1、T2、T4、T5、T6)全生育期磷肥用量为 P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、钾肥用量为 K₂O 75 kg·hm⁻²，均用做基肥一次性施入。其中 T2、T4、T5、T6 处理的氮肥均采用基追配合的模式：50%氮肥做基肥，剩余 50%氮肥于冬小麦拔节期追施。腐植酸为粉状、撒施，全部用做基肥一次性施入。所有处理的种植密度及其他水肥管

理措施按照当地高产优质小麦生产技术规程进行, 各项措施由专人在同一个工作日内完成。

1.2 采样与测定方法

冬小麦成熟后, 1 m² 实收计产, 按照 1 m 双行法调查产量构成要素。取每个小区植株样, 分为籽粒、颖壳、茎叶等, 计算各部位生物量, 并烘干粉碎, 测定各部位氮含量及其累积量, 计算氮肥利用效率。植株样品采用硫酸-双氧水法消煮, 全氮采用凯氏定氮法进行测定^[19]。

以下参数计算公式参考彭少兵等^[20]及邹娟等^[21]的方法, 用以表征肥料的利用效率。

氮素积累量(kg·hm⁻²)=非收获物干重×非收获物氮含量+收获物干重×收获物氮含量 (1)

氮肥偏生产力(kg·kg⁻¹)=施氮肥区产量/施氮肥量 (2)

氮肥农学效率(kg·kg⁻¹)=(施氮肥区产量-不施氮肥区产量)/施氮肥量 (3)

氮肥利用效率=(施氮肥区植株地上部氮素积累量-不施氮肥区植株地上部氮素积累量)/施氮量 (4)

氮肥贡献率(%)=(施氮肥区产量-不施氮肥区产

量)/施氮肥区产量×100% (5)

试验数据均采用 Microsoft Excel 2003 和 SAS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 腐植酸与氮肥配施对冬小麦产量及其构成要素的影响

试验结果表明(表 1), 不同施肥处理 2014 年和 2015 年两年的平均有效穗数方面总体呈如下趋势: T5>T6>T2>T4>T3>T1, T5 处理显著高于其他处理, T1 处理显著低于其他处理; 穗粒数和千粒重均呈现: T5>T6>T4>T2>T1>T3; 产量指标表现为: T5>T6>T4>T2>T3>T1。总体上显示, 施氮处理显著优于不施氮处理, 腐植酸与氮肥配施优于单施化肥, 其中以 T5 处理最佳, 其两年平均有效穗数、穗粒数、千粒重和产量较 T2 处理分别高 2.97%、1.30%、0.62% 和 4.96%。然而, T6 处理两年平均有效穗数、穗粒数、千粒重、产量等方面稍优于 T2 和 T4 处理, 但均低于 T5 处理。

表 1 不同施肥处理对冬小麦产量及产量构成要素的影响

Table 1 Effects of different fertilization treatments on yield and it's component of winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	有效穗数 Ears (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Grains number per ear	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg·hm ⁻²)
2014	T1	467.52±7.38c	29.34±2.05ab	49.06±3.56b	5 986.62±67.03c
	T2	538.06±9.03ab	34.08±2.82a	56.52±4.06a	8 169.223±38.49b
	T3	517.91±13.59bc	26.89±3.68b	48.54±2.81b	6 086.29±50.95c
	T4	528.46±4.59b	33.92±1.59a	55.85±3.08a	8 406.95±52.03ab
	T5	557.64±8.06a	32.89±5.68a	54.62±1.96a	8 609.56±48.26a
	T6	536.92±10.25ab	34.02±2.03a	55.92±3.02a	8 269.53±48.67b
2015	T1	472.52±11.59b	30.73±1.09b	51.37±2.10b	6 063.14±39.06d
	T2	528.66±9.57a	32.32±3.47ab	53.68±1.06b	8 415.11±75.94ab
	T3	536.31±8.67a	30.88±1.86b	51.41±2.06b	6 851.40±39.46c
	T4	534.09±9.56a	32.68±2.09ab	54.58±2.73a	8 202.17±47.61b
	T5	540.75±6.92a	34.38±1.09a	56.25±2.03a	8 797.25±49.20a
	T6	533.13±6.50a	32.79±2.56ab	54.60±1.98a	8 519.80±63.09ab
2014 年和 2015 年平均 Average of 2014 and 2015	T1	470.02±13.85c	30.03±5.12b	50.22±3.58b	6 024.88±46.23d
	T2	533.36±14.23b	33.20±4.81a	55.10±5.26a	8 292.17±38.42b
	T3	527.11±9.08b	28.88±6.57b	49.97±1.87b	6 468.85±55.07c
	T4	531.28±10.01b	33.30±3.89a	55.22±4.67a	8 304.56±49.34b
	T5	549.19±18.23a	33.63±6.55a	55.44±2.52a	8 703.41±53.29a
	T6	535.03±17.54b	33.41±6.59a	55.26±3.20a	8 394.67±50.80ab

T1: 不施氮肥, 全生育期施 P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 75 kg·hm⁻²; T2: 常规施肥, 全生育期施 N 180 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 75 kg·hm⁻²; T3: 单施腐植酸 3 000 kg·hm⁻²; T4: 常规施肥+腐植酸 3 000 kg·hm⁻²; T5: 常规施肥减氮 15%+腐植酸 3 000 kg·hm⁻²; T6: 常规施肥减氮 30%+腐植酸 3 000 kg·hm⁻²。同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。T1: application of 90 kg·hm⁻² P₂O₅ and 75 kg·hm⁻² K₂O without N application; T2: conventional fertilization, application of 180 kg·hm⁻² N, 90 kg·hm⁻² P₂O₅, and 75 kg·hm⁻² K₂O; T3: application of 3 000 kg·hm⁻² humic acid; T4: conventional fertilization + 3 000 kg·hm⁻² humic acid application; T5: conventional fertilization with 15% nitrogen reduction + 3 000 kg·hm⁻² humic acid application; T6: conventional fertilization with 30% nitrogen reduction + 3 000 kg·hm⁻² humic acid application. Different letters in the same column mean significant differences at 5% level.

2.2 腐植酸与氮肥配施对冬小麦各部位氮含量和累积量的影响

由图 1 可知, 不同施肥处理冬小麦各器官的氮含量高低趋势为: T5>T6>T4>T2>T1>T3。T5、T6、T4 和 T2 处理各器官氮含量显著高于 T1 和 T3 处理。说明施用氮肥能够增加植株各器官氮含量, 单施腐植酸不能满足氮素需求, 影响氮素吸收和积累。T4、T5、T6 处理的籽粒氮含量较 T2 处理分别高 3.97%、23.02% 和 17.46%, 其中 T5 与 T2 处理间差异达显著水平($P<0.05$)。说明在常规施肥的基础上配施一定量的腐植酸较常规施肥相比, 可以促进植株各器官对氮素的吸收。

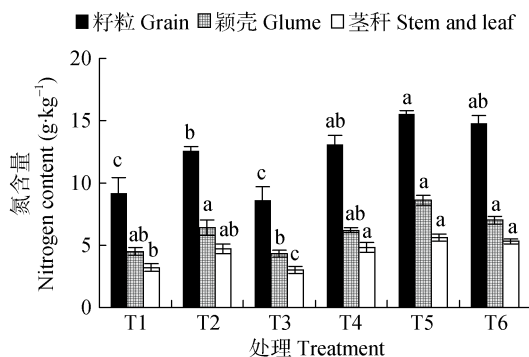


图 1 不同施肥处理对冬小麦植株各部位氮含量的影响
Fig. 1 Effects of different fertilization treatments on nitrogen contents of different parts of winter wheat plant

T1: 不施氮肥, 全生育期施 P_2O_5 90 $kg\cdot hm^{-2}$ 、 K_2O 75 $kg\cdot hm^{-2}$; T2: 常规施肥, 全生育期施 N 180 $kg\cdot hm^{-2}$ 、 P_2O_5 90 $kg\cdot hm^{-2}$ 、 K_2O 75 $kg\cdot hm^{-2}$; T3: 单施腐植酸 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$; T4: 常规施肥+腐植酸 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$; T5: 常规施肥减氮 15%+腐植酸 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$; T6: 常规施肥减氮 30%+腐植酸 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$ 。图中数据为 2014 年和 2015 年的平均值; 不同小写字母表示同一测定部位不同处理间差异显著($P<0.05$)。T1: application of 90 $kg\cdot hm^{-2}$ P_2O_5 and 75 $kg\cdot hm^{-2}$ K_2O without N application; T2: conventional fertilization, application of 180 $kg\cdot hm^{-2}$ N, 90 $kg\cdot hm^{-2}$ P_2O_5 , and 75 $kg\cdot hm^{-2}$ K_2O ; T3: application of 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$ humic acid; T4: conventional fertilization + 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$ humic acid application; T5: conventional fertilization with 15% nitrogen reduction + 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$ humic acid application; T6: conventional fertilization with 30% nitrogen reduction + 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$ humic acid application. Figure data are mean value of 2014 and 2015. Different lowercase letters indicate significant differences under various treatments in the same part of plant at $P<0.05$.

由图 2 可知, 不同施肥处理冬小麦各器官总氮累积量高低趋势为: T5>T6>T4>T2>T3>T1, 施氮处理(T2、T4、T5、T6)显著高于不施氮处理(T3、T1)。其中, T3 处理各部位的氮素累积量均高于 T1 处理, 但差异未达显著水平($P<0.05$); T2、T4、T5 和 T6 处理较 T1 处理籽粒氮累积量、总氮累积量增加幅度分别达 88.49%~143.77%和 80.71%~114.89%。说明施用氮素可以大幅度提升植株各器官的氮素累积量, 在促进植株各器官对氮素的累积上, 单施腐植酸稍优于单施磷钾肥。

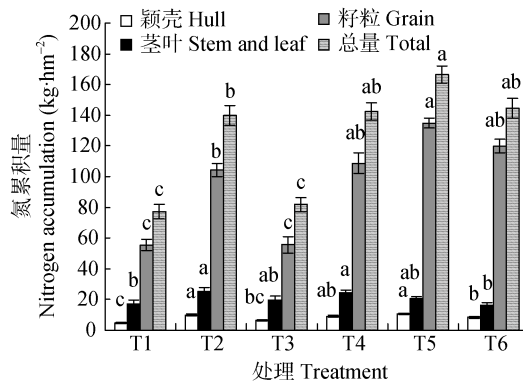


图 2 不同施肥处理对冬小麦植株氮积累和分配的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on N accumulation and allocation of winter wheat plant

T1: 不施氮肥, 全生育期施 P_2O_5 90 $kg\cdot hm^{-2}$ 、 K_2O 75 $kg\cdot hm^{-2}$; T2: 常规施肥, 全生育期施 N 180 $kg\cdot hm^{-2}$ 、 P_2O_5 90 $kg\cdot hm^{-2}$ 、 K_2O 75 $kg\cdot hm^{-2}$; T3: 单施腐植酸 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$; T4: 常规施肥+腐植酸 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$; T5: 常规施肥减氮 15%+腐植酸 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$; T6: 常规施肥减氮 30%+腐植酸 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$ 。图中数据为 2014 年和 2015 年的平均值; 不同小写字母表示同一测定部位不同处理间差异显著($P<0.05$)。T1: application of 90 $kg\cdot hm^{-2}$ P_2O_5 and 75 $kg\cdot hm^{-2}$ K_2O without N application; T2: conventional fertilization, application of 180 $kg\cdot hm^{-2}$ N, 90 $kg\cdot hm^{-2}$ P_2O_5 , and 75 $kg\cdot hm^{-2}$ K_2O ; T3: application of 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$ humic acid; T4: conventional fertilization + 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$ humic acid application; T5: conventional fertilization with 15% nitrogen reduction + 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$ humic acid application; T6: conventional fertilization with 30% nitrogen reduction + 3 000 $kg\cdot hm^{-2}$ humic acid application. Figure data are mean value of 2014 and 2015. Different lowercase letters indicate significant differences under various treatments in the same part of plant at $P<0.05$.

T4、T5、T6 处理的籽粒氮累积量、总氮累积量均高于 T2 处理, 其中 T5 处理与 T2 处理间的总氮累积量差异达显著水平($P<0.05$)。但 T4、T5、T6 处理的茎叶氮累积量较 T2 处理分别降低 3.22%、18.81% 和 36.61%, 说明在常规施肥的基础上配施一定量的腐植酸在提升植株地上部总氮累积量的同时, 降低了植株茎叶部分的氮累积量, 提升了植株籽粒氮累积量。在所有处理中 T5 处理(减氮 15%)效果最佳, 不仅能促进植株对氮素的累积, 更能进一步促进籽粒对氮素的累积。

2.3 腐植酸与氮肥配施对冬小麦氮肥利用效率的影响

由表 2 可知, 氮肥偏生产力高低趋势为: T6>T5>T4>T2; 氮肥农学效率和氮肥利用效率均呈如下趋势: T5>T6>T4>T2; 氮肥贡献率为: T5>T4>T2>T6。说明在常规施肥的基础上配施一定量的腐植酸能提高氮肥的偏生产力、农学效率、贡献率和氮肥利用效率。在所有处理中, T5 处理效果最佳, 即在减氮 15%的条件下, 氮肥利用效率、氮肥贡献率、氮肥农学效率均达到最大值, 均显著高于 T2 处理; 在

表 2 不同施肥处理对冬小麦氮肥利用效率的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on nitrogen fertilizer utilization efficiency of winter wheat

处理 Treatment	氮肥偏生产力 Partial factor productivity of N fertilizer (kg·kg ⁻¹)	氮肥农学效率 Agronomic efficiency of N fertilizer (kg·kg ⁻¹)	氮肥贡献率 Nitrogen contribution efficiency (%)	氮肥利用效率 Recovery efficiency of N fertilizer (%)
T6	64.24±9.25a	16.43±3.58a	34.35±5.96bc	53.21±6.89ab
T5	56.89±7.62b	17.51±4.25a	44.46±8.56a	58.14±7.28a
T4	46.13±6.59c	12.66±3.98b	37.84±7.23b	36.16±4.96c
T2	46.07±8.94c	12.60±1.59b	37.63±4.59b	34.72±3.99c
T3	—	—	—	—
T1	—	—	—	—

T1: 不施氮肥, 全生育期施 P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 75 kg·hm⁻²; T2: 常规施肥, 全生育期施 N 180 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 75 kg·hm⁻²; T3: 单施腐植酸 3 000 kg·hm⁻²; T4: 常规施肥+腐植酸 3 000 kg·hm⁻²; T5: 常规施肥减氮 15%+腐植酸 3 000 kg·hm⁻²; T6: 常规施肥减氮 30%+腐植酸 3 000 kg·hm⁻²。同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。T1: application of 90 kg·hm⁻² P₂O₅ and 75 kg·hm⁻² K₂O without N application; T2: conventional fertilization, application of 180 kg·hm⁻² N, 90 kg·hm⁻² P₂O₅, and 75 kg·hm⁻² K₂O; T3: application of 3 000 kg·hm⁻² humic acid; T4: conventional fertilization + 3 000 kg·hm⁻² humic acid application; T5: conventional fertilization with 15% nitrogen reduction + 3 000 kg·hm⁻² humic acid application; T6: conventional fertilization with 30% nitrogen reduction + 3 000 kg·hm⁻² humic acid application. Different letters in the same column mean significant differences at 0.05 level.

减氮 30%的条件下氮肥利用效率有所降低, 但仍高于常规施肥处理。

2.4 腐植酸与氮肥配施对冬小麦经济效益的影响

由表 3 可知, 与 T1 处理相比, 其他各处理产值、纯收益等指标均高于 T1 处理, 且差异达显著水平 ($P<0.05$)。其中, 不同处理的产值大小趋势为: T5>T6>T4>T2>T3>T1, 纯收益为: T5>T2>T6>T4>T3>T1, 但产投比的高低趋势为: T2>T5>T6>T3>T4>T1。说明施用氮肥可以显著提高冬小麦的产值、纯收益和产投比。

在所有处理中减氮 15%配施腐植酸处理的产值和纯收益最高, 产值分别比 T1、T2、T3、T4 和 T6 高 44.46%、4.96%、34.54%、4.80%和 3.68%, 纯收益分别比 T1、T2、T3、T4 和 T6 高 52.57%、2.18%、36.44%、10.66%和 3.89%, 且差异达显著水平 ($P<0.05$)。但是减氮 30%会导致冬小麦产值和收益降低。由于施用腐植酸增加了农资投入和其他投入, 腐植酸配施化肥的产投比低于单施化肥即常规施肥处理。综上可知, T5 处理即减氮 15%配施腐植酸在研究区域最具有实用价值。

表 3 不同施肥处理对冬小麦经济效益的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on economic benefit of winter wheat

处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	产值 Yield value (¥·hm ⁻²)	农资投入 Agricultural inputs (¥·hm ⁻²)	其他投入 Other inputs (¥·hm ⁻²)	总投入 Total inputs (¥·hm ⁻²)	纯收益 Net income (¥·hm ⁻²)	产投比 Ratio of output to input
T1	6 024.88d	13 254.74d	825	4 800	5 625	7 629.7f	1.36c
T2	8 292.17b	18 242.77b	1 451	5 400	6 851	11 391.69b	1.66a
T3	6 468.85c	14 231.47c	900	4 800	5 700	8 531.47e	1.50b
T4	8 304.56b	18 270.03b	2 351	5 400	7 751	10 518.95d	1.37c
T5	8 703.41a	19 147.50a	2 257	5 250	7 507	11 640.33a	1.55b
T6	8 394.67ab	18 468.27ab	2 163	5 100	7 263	11 205.01c	1.54b

T1: 不施氮肥, 全生育期施 P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 75 kg·hm⁻²; T2: 常规施肥, 全生育期施 N 180 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 75 kg·hm⁻²; T3: 单施腐植酸 3 000 kg·hm⁻²; T4: 常规施肥+腐植酸 3 000 kg·hm⁻²; T5: 常规施肥减氮 15%+腐植酸 3 000 kg·hm⁻²; T6: 常规施肥减氮 30%+腐植酸 3 000 kg·hm⁻²。表中数据为 2014 年和 2015 年的平均值; 农资投入包括种子、化肥和农药, 其中, 尿素为 1.6 元·kg⁻¹, 过磷酸钙 0.6 元·kg⁻¹, 氯化钾 3.0 元·kg⁻¹, 腐植酸 0.3 元·kg⁻¹。其他投入包括机械作业和人工投入, 2015 年冬小麦市场价格为 2.2 元·kg⁻¹。同列数据后不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。T1: application of 90 kg·hm⁻² P₂O₅ and 75 kg·hm⁻² K₂O without N application; T2: conventional fertilization, application of 180 kg·hm⁻² N, 90 kg·hm⁻² P₂O₅, and 75 kg·hm⁻² K₂O; T3: application of 3 000 kg·hm⁻² humic acid; T4: conventional fertilization + 3 000 kg·hm⁻² humic acid application; T5: conventional fertilization with 15% nitrogen reduction + 3 000 kg·hm⁻² humic acid application; T6: conventional fertilization with 30% nitrogen reduction + 3 000 kg·hm⁻² humic acid application. Table data are mean value of 2014 and 2015. Agricultural inputs include inputs of seeds, fertilizers and pesticides. The prices of urea, superphosphate, potassium chloride and humic acid are 1.6 ¥·kg⁻¹, 0.6 ¥·kg⁻¹, 3.0 ¥·kg⁻¹, 0.3 ¥·kg⁻¹, respectively. Other inputs include machinery and manual inputs in operation, straw to field. The price of wheat is 2.2 ¥·kg⁻¹ in 2015. Different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level.

3 讨论与结论

在农业生产中, 合理的氮肥施用量不仅能够增

加冬小麦的产量、产量构成要素, 还能够提升土壤肥力, 提高氮肥利用效率, 达到节约资源、保护环境的目的。成绍鑫^[22]、李善祥等^[23]通过对腐植酸和尿

素的混合施用研究表明,腐植酸对尿素的缓释增效作用十分明显,不但能提高作物产量,还可使氮利用率提高6.9%~11.9%。赵国林等^[24]研究表明,腐植酸能促进作物对养分的吸收利用,显著提高作物产量。徐钰等^[25]和孙占祥等^[26]研究发现,施用氮肥能明显改善夏玉米的生物学性状,且能够显著提高玉米产量,但氮肥投入需要一个适宜量,并不是越高越好。国外相关研究也表明,适宜的氮肥用量可以显著增加冬小麦的产量,同时配施一定量的腐植酸能够起到增加产量及其构成要素的效果^[27]。本试验结果表明,施用氮肥可以促进冬小麦植株的生长,显著提高冬小麦产量及其构成要素,其中以常规施肥减氮15%配施腐植酸3 000 kg·hm⁻²的效果最佳,较常规施肥处理冬小麦增产幅度达4.96%。说明在配施腐植酸的基础上,适量减氮是可行的,不仅能增加小麦产量,也会提升整体效益。这一结论与孙志梅等^[28]的研究结果相似。

冬小麦植株各部位的氮素吸收及累积与施氮量有着密切关系,农作物对氮素的吸收和累积是作物产量和干物质形成的基础,适当的氮肥用量不仅能够促进作物生长发育,还能促进植株对氮素的吸收及累积^[29-30]。王珂等^[31]研究表明,腐植酸可以促进小麦对M²⁺或Fe²⁺的吸收,促进干物质积累增加。陈振德等^[32]通过在玉米上研究发现,腐植酸能明显促进玉米植株对N、P、K养分的吸收,但运转分配到籽粒中N素的相对量较常规施肥低,即腐植酸对N素的运转分配并未受到同步促进。本研究结果表明,施用氮肥可以显著提高冬小麦各器官氮含量,进而提高冬小麦各器官氮素累积量。在常规施肥的基础上配施一定量的腐植酸更能显著提高冬小麦各器官氮含量,进而提高冬小麦各器官氮素累积量,并能促进氮素向籽粒的转移,降低植株茎、叶、颖壳的氮素累积量,提升植株籽粒氮累积量。其中以常规施肥减氮15%配施腐植酸3 000 kg·hm⁻²的效果最佳,其籽粒氮含量、籽粒氮累积量和氮肥利用效率都显著高于常规施肥处理。腐植酸配施氮肥能大幅度提高氮肥利用效率。这可能与腐植酸含有多种较强的活性官能团(氨基、醌基、羟基等)有关^[12,33-34]。

氮肥吸收利用特征是氮肥运筹是否合理的重要指示,通常研究采用氮肥利用率、氮肥贡献率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力等参数来表示。本研究氮肥利用结果为:氮肥农学效率12.60~17.51 kg·kg⁻¹、氮肥利用率34.72%~58.14%、氮肥偏生产力46.07~64.24 kg·kg⁻¹和氮肥贡献率34.35%~44.46%,较其他研究相对偏高^[4,35-38]。说明施用腐植酸能显著提高氮

肥的利用效率。另外由于本试验区的施氮量在腐植酸的配施下相对较低,为126~180 kg·hm⁻²,腐植酸促进了氮素的吸收利用,再加上本试验条件下不施氮肥区的冬小麦产量和养分积累量相对较低,用差减法计算出的农学效率和肥料利用率势必较高。这说明腐植酸与氮肥配施具有兼顾冬小麦高产、高效、节肥而不导致土壤养分降低的重要措施。

评价某项技术的社会实际应用价值,不但要有增产效果,最重要的还是经济效益。本研究中,所有施氮处理均获得了较高的冬小麦产值和纯收益。然而,常规施肥减氮15%+腐植酸3 000 kg·hm⁻²处理的产值和纯收益最高,但是减氮30%的条件下会导致冬小麦产值和收益降低。这充分说明,在施用腐植酸的基础上配施适宜的氮肥用量才能获得较高的产值和收益。

综上所述:在冬小麦实际生产中,腐植酸与氮肥配施可以促进冬小麦的生长发育,有效改善冬小麦构成要素、提高冬小麦的产量、促进植株对氮素的累积和提高氮肥的利用率。其中,以常规施肥减氮15%+腐植酸3 000 kg·hm⁻²处理效果最佳,不仅起到增产增效的效果,还能实现节约资源、保护环境的目的。因此,在现代化农业生产中配施一定量的腐植酸,对构造环境友好型、资源节约型社会有着十分重要的意义。

参考文献 References

- [1] 张焕军,郁红艳,项剑,等. 氮磷用量对豫北地区小麦产量的交互效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1163-1169
Zhang H J, Yu H Y, Xiang J, et al. Interactive influence of nitrogen and phosphorus application rate on wheat yield in North Henan, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(6): 1163-1169
- [2] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3041-3046
- [3] 巨晓棠,张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 192-197
Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(2): 192-197
- [4] 门明新,李新旺,许峰. 长期施肥对华北平原潮土作物产量及稳定性的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2339-2346
Men M X, Li X W, Xu H. Effects of long-term fertilization on crop yields and stability[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(8): 2339-2346
- [5] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000,

- 9(1): 1-6
Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1-6
- [6] Cui Z L, Yue S C, Wang G L, et al. In-season root-zone N management for mitigating greenhouse gas emission and reactive N losses in intensive wheat production[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(11): 6015-6022
- [7] 杨青林, 桑利民, 孙吉茹, 等. 我国肥料利用现状及提高化肥利用率的方法[J]. 山西农业科学, 2011, 39(7): 690-692
Yang Q L, Sang L M, Sun J R, et al. Current situation of fertilizer use in China and the method to improve chemical fertilizer utilization efficiency[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2011, 39(7): 690-692
- [8] 周爽, 其力莫格, 谭钧, 等. 腐植酸提高土壤氮磷钾养分利用效率的机制[J]. 腐植酸, 2015(2): 1-8
Zhou S, Qilimoge, Tan J, et al. Strategies in efficient utilization of soil NPK nutrients with humic acid amendments[J]. Humic Acid, 2015(2): 1-8
- [9] Brown K H, Bach E M, Drijber R A, et al. A long-term nitrogen fertilizer gradient has little effect on soil organic matter in a high-intensity maize production system[J]. Global Change Biology, 2014, 20(4): 1339-1350
- [10] 梁宗存, 成邵鑫, 武丽萍. 煤中腐植酸与尿素相互作用机理的研究[J]. 燃料化学学报, 1999, 27(2): 176-181
Liang Z C, Cheng S X, Wu L P. Study on mechanism of interaction between coal humic acid and urea[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1999, 27(2): 176-181
- [11] 孙克刚, 张梦, 李玉顺. 腐植酸尿素对冬小麦增产效果及氮肥利用率的影响[J]. 腐植酸, 2016(3): 18-21
Sun K G, Zhang M, Li Y S. Effects of urea humate on winter-wheat yield increase and utilization rate of nitrogen fertilizer[J]. Humic Acid, 2016(3): 18-21
- [12] 许俊香, 邹国元, 孙钦平, 等. 腐植酸尿素对土壤氮挥发和玉米生长的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 934-939
Xu J X, Zou G Y, Sun Q P, et al. Effects of mixing humic acid and urea on ammonia volatilization and maize growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(4): 934-939
- [13] 刘增兵, 赵秉强, 林治安. 腐植酸尿素氮挥发特性及影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 208-213
Liu Z B, Zhao B Q, Lin Z A. Ammonia volatilization characteristics and related affecting factors of humic acid urea[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 208-213
- [14] 孙建好, 郭天文, 杨思存, 等. 腐植酸类肥料对小麦/大豆带田产量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2001(1): 35-36
Sun J H, Guo T W, Yang S C, et al. Effect of humic acids fertilizer on yield of wheat soybean strip fields[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2001(1): 35-36
- [15] 郝青, 梁亚勤, 刘二保. 腐植酸复混肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(8): 853-856
Hao Q, Liang Y Q, Liu E B. Effect of humic acid compound fertilizer on maize yield and soil fertility[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2012, 40(8): 853-856
- [16] 马斌, 刘景辉, 张兴隆. 褐煤腐植酸对旱作燕麦土壤微生物量碳、氮、磷含量及土壤酶活性的影响[J]. 作物杂志, 2015(5): 134-140
Ma B, Liu J H, Zhang X L. Effects of applying brown coal humic acid on soil enzyme activity and microbial biomass C, N and P content of oat in dry farming[J]. Crops, 2015(5): 134-140
- [17] 付保东. 腐植酸在土壤改良中的应用研究进展[J]. 防护林科技, 2016(3): 83-84
Fu B D. Research progress on application of humic acid in soil improvement[J]. Protection Forest Science and Technology, 2016(3): 83-84
- [18] 刘秀梅, 张夫道, 冯兆滨, 等. 风化煤腐植酸对氮、磷、钾的吸附和解吸特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 641-646
Liu X M, Zhang F D, Feng Z B, et al. N, P and K adsorption and desorption characteristics of humic acids made from the airslake-coal[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(5): 641-646
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 56-57, 79-83, 106-107, 30-34, 265-271
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 56-57, 79-83, 106-107, 30-34, 265-271
- [20] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095-1103
- [21] 邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 等. 长江流域油菜氮磷钾肥料利用率现状研究[J]. 作物学报, 2011, 37(4): 729-734
Zou J, Lu J W, Chen F, et al. Status of nutrient use efficiencies of rapeseed in the Yangtze River basin[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(4): 729-734
- [22] 成绍鑫. 重新认识腐植酸对化肥的增效作用及有关对策[J]. 腐植酸, 1998(3): 1-9
Cheng S X. A new understanding of the synergistic effect and relevant countermeasures of humic acid on chemical fertilizer[J]. Humic Acid, 1998(3): 1-9
- [23] 李善祥, 晁兵, 苏书文, 等. 腐植酸涂层尿素及其在玉米上施用的增产效应研究[J]. 腐植酸, 1999(3): 12-14
Li S X, Chao B, Su S W, et al. Study on the yield increasing effect of humic acid coated urea and its application in rice[J]. Humic Acid, 1999(3): 12-14
- [24] 赵国林, 阎晗, 刘志伟, 等. 腐植酸类复混肥料的应用前景[J]. 现代化农业, 2000(9): 13-15
Zhao G L, Yan H, Liu Z W, et al. The application prospect of humic acid compound fertilizer[J]. Modernizing Agriculture, 2000(9): 13-15
- [25] 徐钰, 江丽华, 林海涛, 等. 不同氮肥运筹对玉米产量、效益及土壤硝态氮含量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1196-1199
Xu Y, Jiang L H, Lin H T, et al. Effects of different nitrogen regulation on maize yield, economic benefit and the content of soil nitrate-N[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1196-1199

- [26] 孙占祥, 邹晓锦, 张鑫, 等. 施氮量对玉米产量和氮素利用效率及土壤硝态氮累积的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(5): 119–123
Sun Z X, Zou X J, Zhang X, et al. Effects of maize yield and N application on N utilization and content of soil nitrate[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(5): 119–123
- [27] Johnston A E, Poulton P R. Nitrogen in agriculture: An overview and definitions of nitrogen use efficiency[C]// Proceedings of the International Fertilizer Society. Harpenden, Herts: Rothamsted Research, 2009: 651
- [28] 孙志梅, 刘欢, 苗泽兰, 等. 腐植酸肥料对玉米和小麦生长发育的影响[J]. 腐植酸, 2015(2): 20–24
Sun Z M, Liu H, Miao Z L, et al. Effects of humic acid fertilizer on the growth of maize and wheat[J]. Humic Acid, 2015(2): 20–24
- [29] 赵俊晔, 于振文. 高产条件下施氮量对冬小麦氮素吸收分配利用的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(4): 484–490
Zhao J Y, Yu Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate on uptake, distribution and utilization of nitrogen in winter wheat under high yielding cultivated condition[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(4): 484–490
- [30] 段敏, 同延安, 魏样, 等. 不同施肥条件下冬小麦氮素吸收、转运及累积的研究[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(3): 464–468
Duan M, Tong Y A, Wei Y, et al. Study on nitrogen uptake, transformation and accumulation in winter wheat under different fertilization[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(3): 464–468
- [31] 王珂, 范洁红. 腐殖质促进小麦生长的生理机制研究[J]. 腐植酸, 1998(3): 32–34
Wang K, Fan J H. Study on the physiological mechanism of humus promoting wheat growth[J]. Humic Acid, 1998(3): 32–34
- [32] 陈振德, 何金明, 李祥云, 等. 施用腐植酸对提高玉米氮肥利用率的研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 52–54
Chen Z D, He J M, Li X Y, et al. Studies on increasing N utilizing efficiency in maize by applying humic acid[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(1): 52–54
- [33] Jezierski A, Czechowski F, Jerzykiewicz M, et al. Electron Paramagnetic resonance (EPR) studies on stable and transient radicals in humic acids from compost, soil, peat and brown coal[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2000, 56(2): 379–385
- [34] Peuravuori J, Žbáňková P, Pihlaja K. Aspects of structural features in lignite and lignite humic acids[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87(9): 829–839
- [35] 宇万太, 姜子绍, 周桦, 等. 不同施肥制度对作物产量及肥料贡献率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 54–58
Yu W T, Jiang Z S, Zhou H, et al. Crop yield and fertilizer contribution under different fertilization systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(6): 54–58
- [36] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in china and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924
- [37] 马迎辉, 王玲敏, 叶优良, 等. 栽培管理模式对冬小麦干物质积累、氮素吸收及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(10): 1282–1288
Ma Y H, Wang L M, Ye Y L, et al. Effects of different cultivation management modes on dry matter accumulation, nitrogen uptake and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(10): 1282–1288
- [38] 薛正平, 杨星卫, 段项锁, 等. 土壤养分与春小麦产量关系及最佳施肥量研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(4): 110–112
Xue Z P, Yang X W, Duan X S, et al. Study on the relationship between soil nutrient and spring wheat yield and optimum fertilization[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(4): 110–112